

単板剥ぎ取り機械に関する研究 (XXVI)*

単板の傾斜送り二次元切削における工具すくい面の
切削応力分布および摩擦係数について (1)

杉 山 滋

長崎大学教育学部技術教育教室

(平成16年3月15日受理)

Studies on Veneer Cutting Machine (XXVI)*

On the Stress Distribution and the Frictional Coefficient
on the Tool Rake-Face in Veneer Cutting (1)

Shigeru SUGIYAMA

Department of Technology Education, Faculty of Education,

Nagasaki University, Nagasaki 852-8521

(Received March 15, 2004)

Abstract

This report clarifies the effects of the inclination angle of the workpiece upon the stress distribution and the frictional coefficient on the interface between the tool rake-face and the veneer in veneer cutting. At first, the variations of the tool-veneer contact length (ℓ_{kn}) with the depth of cut (t_n) and the workpiece inclination-angle (i) were clarified (Figs.3 and 4). Based on the results of ℓ_{kn} , it was possible to measure the three components of the cutting force corresponding to various rake-face lengths of the T_2 -knife so as to determine the stress distributions (Figs.1, 2 and 5).

1. 緒 言

スライサによる単板切削では、被削材（フリッチ）をその送り方向、または工具の切削方向に対して傾斜させて切削する単板切削方式がある。このようなスライサによる単板切削を対象として、その切削機構を究明することは、スライサの機械設計上の資料として重要となるばかりでなく、スライサによる単板の適正切削条件を選定するための資料としても重要となる（本文では、このような切削方式を“単板の傾斜送り二次元切削”と呼ぶこととする）。そのためには、まず、その原因となる切削力の工具すくい面上における分布（即ち、“切削応力分布”）や、単板とすくい面との接触境界面における摩擦挙動、などを明確にする必要があるが、これらに関する研究は、未だ着手されていない。そこでこの研究では、分割工具を用いて、上記の切削応力分布を測定し、また、その結果から、すくい面上における摩擦挙動（本文では、“すくい面の摩擦係数”を用いて、検討することとする。）、などを明らかにする。

* 前報「単板剥ぎ取り機械に関する研究 (XXV) Studies on Veneer Cutting Machine (XXV)」は、長崎大学教育学部紀要 - 自然科学 - 第69号 45 ~ 50 (2003.6) に掲載。

2. すくい面に働く切削応力分布の測定法

分割工具による単板の傾斜送り二次元切削の模式図を、Fig. 1 に示す。工具すくい面上における単板との接触境界面の大きさを A_c 、切れ刃線切削幅を b_c 、被削材幅を b 、切れ刃線に垂直な方向 (Fig. 1 の Z' 方向) および単板の流出方向 (Fig. 1 の Z_e 方向) における単板接触長さをそれぞれ ℓ_{kn} および ℓ_k 、被削材の傾斜角を i 、単板の流出角を η_c とすれば、 A_c は、近似的に b_c と ℓ_k を隣り合う 2 辺とする平行四辺形とみなすと、 A_c は、

$$A_c = b_c \cdot \ell_{kn} \quad (1)$$

で表し得る。ここで、

$$\ell_{kn} = \ell_k \cdot \cos \eta_c \quad (2)$$

$$b_c = b \cdot \cos i \quad (3)$$

(1)式における ℓ_{kn} を予め実測しておけば、 A_c に働く垂直応力 σ は、つぎのようにして求められる。 ℓ_{kn} の範囲内で、 T_2 ナイフのすくい面長さ ℓ_c を微小に変化させ、このとき ℓ_c に作用する単位 b_c 当りの垂直力 N を測定する。例えば、 ℓ_c の微小の差 $\Delta \ell_c$ に基づく微小な N の差を ΔN とすれば、 σ は、

$$\sigma = \frac{\Delta N}{\Delta \ell_c} \quad (4)$$

で求められる。この研究では、 N を ℓ_c の関数 $N(\ell_c)$ として求め、次式のように、 $N(\ell_c)$ を ℓ_c で微分することにより、 σ を求めた。

$$\sigma = \frac{dN(\ell_c)}{d\ell_c} \quad (5)$$

同様に、 T_2 ナイフに作用する摩擦力 F を ℓ_c の関数 $F(\ell_c)$ として求めると、すくい面の摩擦応力 τ は、

$$\tau = \frac{dF(\ell_c)}{d\ell_c} \quad (6)$$

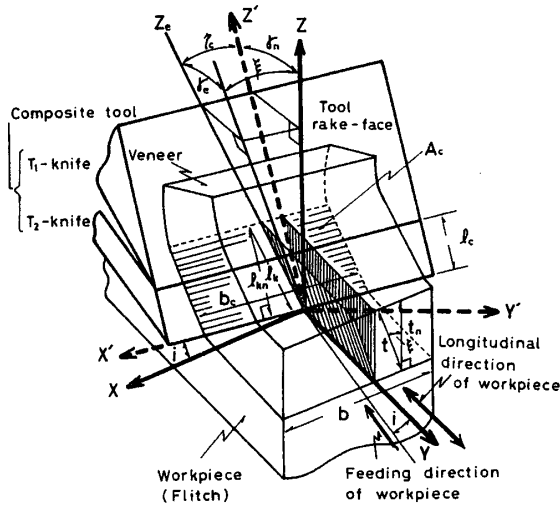


Fig. 1. The tool-work geometry.

i : workpiece inclination-angle; η_c : veneer-flow angle; γ_n : normal rake angle; γ_e : effective rake angle; b : width of workpiece; b_c : actual cutting width of tool; X and Y : the directions perpendicular and parallel, respectively, to the longitudinal direction on cutting surface of workpiece; Z : the direction perpendicular to cutting surface; X' and Z' : the directions parallel and perpendicular, respectively, to the cutting edge on a tool rake-face; Y' : the direction perpendicular to the tool rake-face; Z_e : the direction of veneer flow; ℓ_c : rake face length of T_2 -knife; ℓ_k and ℓ_{kn} : veneer-tool contact lengths in the directions Z_e and Z' ; A_c : veneer-tool contact area; t_n : depth of cut in a plane including the directions of Z' and Y ; t : depth of cut in a plane including the directions of Z_e and Y ; ξ : angle made between t_n and t .

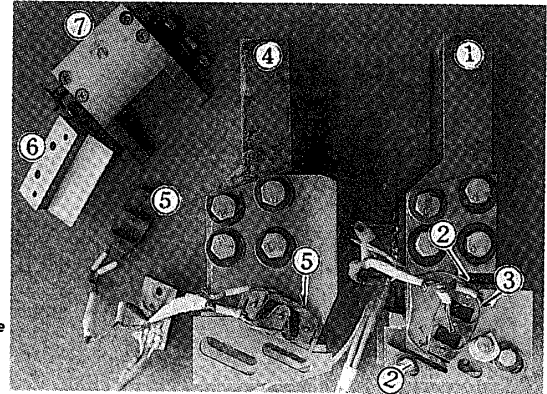
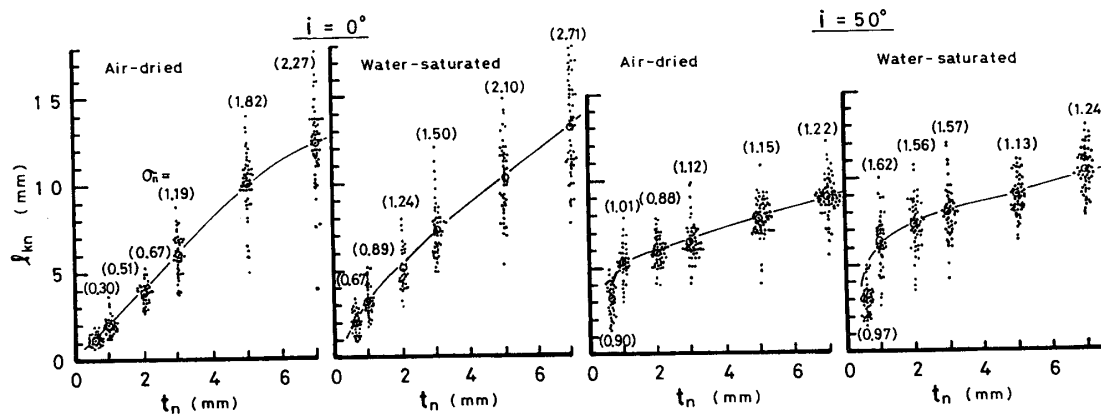
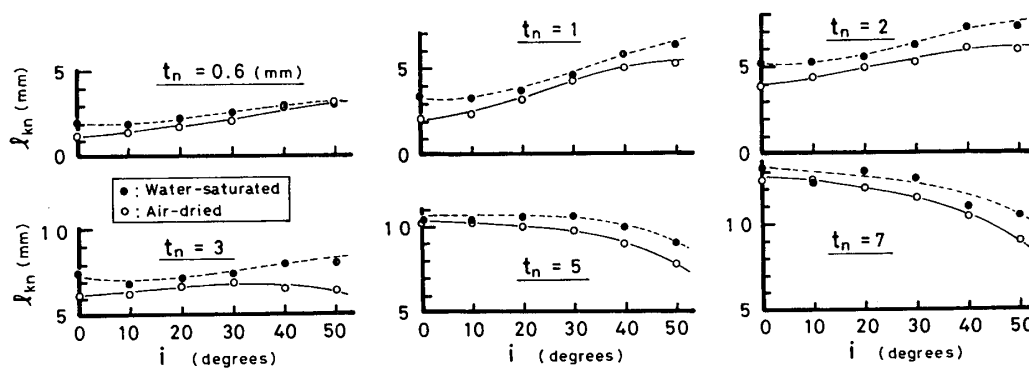


Fig. 2. Composite tools for measuring cutting-force components (F'_x , F'_y and F'_z) on a rake face of T_2 -knife acting to the directions of X' , Y' and Z' .

①: tool for measuring F'_x and F'_y ; ②: strain gauge for measuring F'_x ; ③: dynamometer for measuring F'_y ; ④: tool for measuring F'_z ; ⑤: dynamometer for measuring F'_z ; ⑥: T_1 -knife; ⑦: T_2 -knife.


 Fig. 3. Variation of veneer-tool contact length (l_{kn}) with depth of cut (t_n).

l_{kn} , t_n and i : refer to Figure 1, $-\circ-$: average; The number in the bracket shows standard deviation (σ_n).


 Fig. 4. Variation of veneer-tool contact length (l_{kn}) with workpiece inclination angle (i) at various depths of cut (t_n).

で求められる。この研究のために用いた分割工具を、Fig. 2 に示す。

分割工具による切削では、その工具の構成上、 T_2 ナイフに作用する切削力のみが検出される*¹。即ち、工具すくい面内にあって、切れ刃線に平行方向 (X' 方向)、垂直方向 (Z' 方向)、およびすくい面と切れ刃線とに垂直な方向 (Y' 方向) に作用する切削力の 3 分力、 $F_{X'}$ 、 $F_{Z'}$ および $F_{Y'}$ がそれぞれ測定される (Fig. 1)。これらの分力の測定と同時に、試験片側に装備された“3 分力測定用八角形弾性リング荷重装置”¹⁾ (以下では、略して、“八角形リング”と呼ぶ。) からは、被削材の切削面内にあって、被削材の長軸方向に平行方向 (Y 方向)、垂直方向 (X 方向)、および切削面と長軸方向とに垂直な方向 (Z 方向) に作用する切削力の 3 分力、 F_Y (軸分力)、 F_X (横分力) および F_Z (背分力) がそれぞれ測定される。 T_2 ナイフのすくい面長さ l_c が、単板接触長さ l_{kn} より大きい場合には、分割工具は一種の通常工具とみなし得るから、上記の各分力の間には、被削材の傾斜角を i 、垂直すくい角を γ_n とすると、次式の関係が成立する*²。

*¹ 分割工具は、 T_1 、 T_2 両ナイフと、それらを固定する工具体、側板から構成されている。側板は、Fig. 1 の Y' および X' 方向の両分力を測定する場合と、 Z' 方向の分力を測定する場合とで、構造が異なるが、いずれの場合も、それぞれの分力を測定しようとする方向に構造的に“ばね構造”となっている。最も構造的に部位にひずみゲージが貼付され、それにより、各分力が測定される。分割工具を用いての切削は、前報¹⁾で述べたように、 T_2 ナイフに向けて試験片を送り込むことによって行われる。この場合に、 T_2 ナイフ切れ刃線に対して、試験片の長軸方向となす角度を 90° の位置 (この場合が、二次元切削となる。即ち、 $i = 0^\circ$ の場合。) からある角度 i (被削材の傾斜角) だけ傾斜させる ($0^\circ < i < 90^\circ$ の場合であり、この場合を傾斜送り二次元切削と呼ぶ)。したがって、一般の二次元切削用分割工具²⁾と比較して、この研究のためのそれは、側板へのひずみゲージの貼付位置および T_2 ナイフの切れ刃線長さが異なるほかは、大きな相異はない。

*² 分力は、いずれも、被削材に加わる力として表す。また、便宜上、Fig. 1 に示す各軸の矢印の方向を正の方向、それと反対方向を負の方向とし、後者の場合のみ、(-) を分力の記号の前に付して区別する。

$$\begin{Bmatrix} F'_x \\ F'_y \\ F'_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{ただし, } a_1 &= \cos i & b_1 &= -\sin i & c_1 &= 0 \\ a_2 &= \cos \gamma_n \sin i & b_2 &= \cos \gamma_n \cos i & c_2 &= \sin \gamma_n \\ a_3 &= -\sin \gamma_n \sin i & b_3 &= -\sin \gamma_n \cos i & c_3 &= \cos \gamma_n \end{aligned}$$

したがって、(7)式を利用すれば、分割工具による切削実験の妥当性を検討できる。即ち、分割工具のセットやT₂ナイフの刃先鋭利性の不良などに基づく切削力の分力の測定値が混在することは、実験結果の変動を著しくするのみならず、すくい面の切削応力やすくい面の摩擦係数の的確な傾向を把握するために著しい支障を来す。そこで、 $l_c \leq l_{kn}$ の場合のT₂ナイフに作用する分力を測定しようとする場合に、その時の八角形リングから測定される分力を、 $l_c \geq l_{kn}$ の場合のT₂ナイフによる切削時に測定される分力（T₂ナイフに作用する分力、または被削材に作用する分力のいずれを用いてもよいことになっている。）と比較検討を行った。その結果、両者に有意差のない場合のみ $l_c \leq l_{kn}$ のT₂ナイフに作用する分力をデータとして採用した。なお、有意差のある場合には、T₂ナイフの再研磨や、分割工具を構成するT₁ナイフとT₂ナイフのセットのやり直しを行ったのち、再び分力の測定を繰返し、有意差のないデータの採取を行った。

このようにして測定されたT₂ナイフに作用する分力 $(-F'_x)$ 、 $(-F'_z)$ および F'_y を用いると、すくい面に作用する垂直力 N および摩擦力 F は、

$$N = F'_y \quad (8)$$

$$F = \{((-F'_x)^2 + (-F'_z)^2)\}^{1/2} \quad (9)$$

であるから、 N 、 F をそれぞれ l_c の関数として求めれば、(5)式、(6)式から、すくい面に働く垂直応力 σ および摩擦応力 τ を求めることができる。

3. 実験方法

分割工具のT₂ナイフ（材質は、高速度工具鋼SKH2）の垂直刃先角 β_n を25°、垂直逃げ角 α_n を1°、垂直すくい角 γ_n を64°一定として切削を行う。この場合に、T₁ナイフ（材質は、SKH2）は $\beta_n = 10^\circ$ であるが、T₂ナイフとともに分割工具を構成する際には、 $\gamma_n = 64^\circ$ となるように注意を払った。なお、両ナイフのセットは、これまで行ってきた二次元切削実験時の分割工具のセット²⁾とはほぼ同様とした。T₂ナイフのすくい面長さ l_c は、0.08 mmから l_{kn} (mm)（即ち、単板の接触長さ）までの範囲とし、この範囲内で13～18段階に変化させた。この研究では、被削材の傾斜角 i を0～50°（10°間隔）の範囲で6段階に変化させ、プレッシャバーを作用させないで低速二次元切削を行った。なお、試験片を装備した八角形リングの送り速度は、138.7 mm/minである。切込量 t_n ^{*3}、即ち、Fig. 1に示すように、切れ刃線に垂直な方向（Z'方向）と被削材の長軸方向（Y方向）を含む断面における切込量を0.6～7 mmの範囲で6段階に変化させた。

供試材には、フィリピン産タンギール（*Shorea polysperma* Merr.）の飽水材と気乾材を用いた。それらの材を用いて、被削材の長軸方向が切削面における繊維走向に垂直で、

*3 三次元切削では、単板の流出方向と切削方向を含む断面における切込量 t を用いる場合がある。これを傾斜送り二次元切削にあてはめて考えてみる。 t と t_n のなす角を ξ とすると、 t は、

$$t = t_n / \cos \xi \quad (I)$$

単板の流出角を γ_c 、有効すくい角¹⁾を γ_e とすると、

$$\xi = \cos^{-1} (\cos \gamma_c \cdot \cos \gamma_n / \cos \gamma_e) \quad (II)$$

であるから、これらの関係より t を求めると、本実験の場合、 $i = 50^\circ$ 、 $t_n = 7$ mmとした場合に、 $t = 7.11$ mmと計算される。 t_n と t の差は微小であり、切込量の微小な差を論じる必要がない限り、 t は考えないこととした。

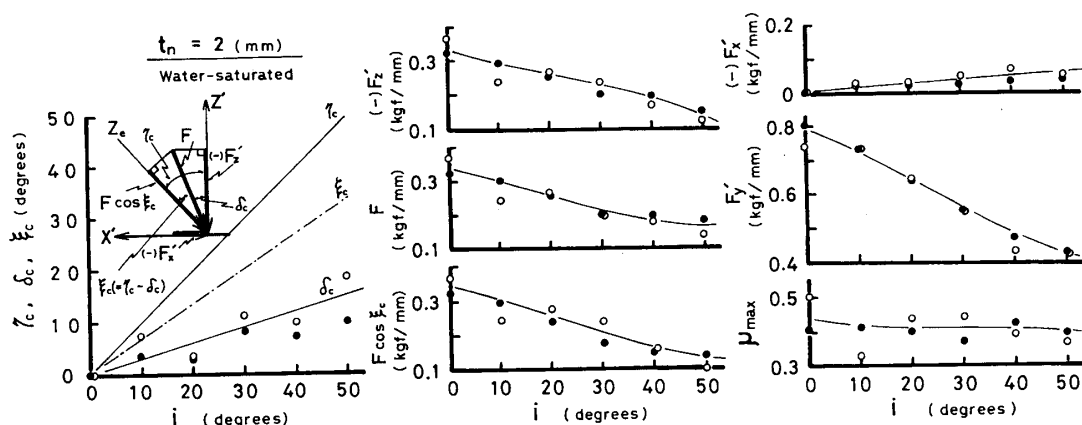


Fig. 5. Comparison of various cutting-force components ($(-F_z')$, $(-F_x')$, F , F_y) measured with two dynamometers during cutting with a composite tool, and various angles (η_c , δ_c , ξ_c) and frictional coefficient (μ_{max}) calculated by using these components.

● : based on values measured with octagonal elastic-ring dynamometer ; ○ : based on values measured with dynamometer attached to a composite tool ; η_c , t_n , i , X' , Z' and Z_e : refer to Figure 1 ; F (frictional force) : resultant force of $(-F_x')$ and $(-F_z')$.

放射組織に対して順目となるような、試験片を作成した。なお、切削面は、追衾目気味の板目面であり、その木表側を切削した。

4. 実験結果および考察

切削応力分布を求めるためには、すくい面への単板の接触長さ l_{kn} を測定し、 T_2 ナイフのすくい面長さ l_c の大きさを決める必要がある。そこで、 $l_c = 20$ mm の T_2 ナイフ（すくい面には、速乾性油性インクを予め塗布した。）を用いて切削を行い、単板がすくい面を擦過するときに生じるインクの擦り取られた跡を25倍の読取顕微鏡にて測定し、この値を l_{kn} とした。実験結果の一例（被削材の傾斜角 $i = 0^\circ$ および $i = 50^\circ$ の場合。）を Fig. 3 に示す（測定値の標準偏差 σ_n も図示した）。 l_{kn} は、著しい変動を示すが、これらの変動は切込量 t_n の大きい場合に、また、気乾材よりも飽水材の場合に、それぞれ大きな値を示した。また、 i の増加に伴い、 l_{kn} は、その変動が大きくなる場合（ t_n の小さい場合）と小さくなる場合（ t_n が大きい場合）とがある。これらの変動は、切削力、すくい面の切削応力分布およびすくい面の摩擦係数などを求める場合に支障を来すが、ここでは、これらの平均値をもって l_{kn} の大きさとし、以下の実験を進めた。したがって、実験結果についても、平均的な傾向を論じることとする。

l_{kn} は、 t_n の増加に伴い、いずれの i の場合も指数関数的な増加傾向を示した。とくに、 $i = 0^\circ$ （即ち、一般の二次元切削）の場合には、その増加の程度が比較的大きいが、 i の増加に伴い、その増加の程度も次第に小さくなる（Fig. 3 参照）。また、 l_{kn} と i との関係性を Fig. 4 に示したが、 $t_n = 3$ mm を境に、 i の変化に伴う l_{kn} の傾向が異なった。飽水材、気乾材いずれの場合も、 i の増加に伴い、 l_{kn} は、 $t_n \leq 3$ mm では増加傾向を、 $t_n \geq 3$ mm では減少傾向を、それぞれ示した。また、いずれの t_n の場合も、気乾材より飽水材で l_{kn} は大きな値を示した。 i の変化に伴うこれら l_{kn} の傾向の相異は、主として、得られる単板の変形の程度に起因すると考えられる。即ち、切削面における繊維走向と切れ刃線とが、

被削材の傾斜角 i だけ絶えず傾斜しているから、 i の増加に伴い、 t_n の大きい場合には変形が著しく妨げられ、それに伴って、大きな先割れが刃先前方の被削材に生じる。したがって、割れによって区切られた一塊の小片の連なりのような形で単板が流出してくるから、接触長さは小さいが、被削母材と同じ剛さをもった単板がすくい面上を擦過する。 t_n の小さい場合には、繊維走向と切れ刃線とが i だけ傾斜していても、 i の増加に伴い単板の変形が助長され、曲率半径が大きく、接触長さも大きい。

つぎに、 T_2 ナイフ ($l_c = 20 \text{ mm}$) に作用する3分力 $(-F'_x)$ 、 $(-F'_z)$ および F'_y と、八角形リングにより測定された被削材に作用する切削力の3分力 F_y 、 F_x および F_z ((7)式により、 $(-F'_x)$ 、 $(-F'_z)$ および F'_y に換算した。) とを比較して、分割工具による切削方法とすくい面の摩擦係数の求め方について、考えてみる。結果の一例 ($t_n = 2 \text{ mm}$, 飽水材の場合。) を Fig. 5 に示す。同図には、上記の各分力のほか、(9)式よりの摩擦力 F 、単板の流出方向で考えた場合の摩擦力や諸角度、およびすくい面の摩擦係数などを示した。いま、すくい面内で切れ刃線に垂直な方向 (Fig. 1 および Fig. 5 における Z' 方向。) を基準として、これと F の作用方向および単板の流出方向 (Z_e 方向) のなす角を、それぞれ $\delta_c (= \tan^{-1}(-F'_x)/(-F'_z))$ および η_c (単板の流出角) とし、また、それらの偏差角を $\xi_c (= \eta_c - \delta_c)$ とした場合、Fig. 5 によれば、 $\eta_c \approx i$ 、 $\eta_c \approx 3\delta_c$ である。言うまでもなく、 $\xi_c \approx 0^\circ$ であるから、摩擦力は、単板の流出方向で考えなければならない。この場合の摩擦力は $F \cos \xi_c$ であり、垂直力 N を用いると、すくい面の摩擦係数 μ_{\min} は、

$$\mu_{\min} = F \cos \xi_c / N \quad (10)$$

しかし、この研究における種々の条件下では、 η_c は、 $2\delta_c \sim 4\delta_c$ の範囲となるが、すくい面の摩擦係数の大きさそのものを問題とするのではないから、以下では、 $\eta_c \approx 2\delta_c$ とし、すくい面の摩擦係数の変化の傾向の検討を進める。この場合の摩擦係数を μ_{\max} とすれば、

$$\mu_{\max} = F \cos \xi_c / N = (-F'_z) / N \quad (11)$$

Fig. 5 より明らかなように、係数、分力、角度のいずれにおいても、分割工具の T_2 ナイフ ($l_c \geq l_{kn}$ となる場合。) による測定値と八角形リングによる測定値は、よく一致している。このような $l_c \geq l_{kn}$ の T_2 ナイフによる測定値を基準に考えながら、 $l_c \leq l_{kn}$ の T_2 ナイフによる分力の測定を行うことによって、切削応力分布が明らかにでき、さらには、それらの切削応力分布から、摩擦係数のすくい面上の分布をも、明らかにすることができる。

5. 摘 要

スライサによる単板切削を対象として、被削材を工具切れ刃線に対して傾斜させて送り込んで単板切削した場合 (便宜上、単板の傾斜送り二次元切削と呼ぶ。) における工具すくい面における単板との接触境界面に働く切削応力分布や摩擦係数を明らかにするために、分割工具を用いて基礎的な単板切削実験を行った。即ち、すくい面への単板の接触長さ l_{kn} の実測結果に基づき、 l_{kn} の範囲内で、すくい面長さと切削力の関係を、分割工具を用いて明らかにし、それに基づいて、すくい面上の切削応力分布や摩擦係数の分布を算出できること、などを明らかにした。

文 献

- 1) 杉山 滋: 木材学会誌, 29, 670~678 (1983).
- 2) 杉山 滋: 木材学会誌, 23, 472~479 (1977).